



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Ott Martens

KAOLIINI MÕJU VEETORUKATLA KÜTTEPINDADELE

EFFECTS OF KAOLIN TO THE HEATING SURFACES OF BOILER

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: Mart Hovi, MSc

Küllli Hovi, MSc

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Ott Martens		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Kaoliini mõju veetorukatla küttepindadele			
Lehekülgi: 42	Jooniseid: 26	Tabeleid: 1	Lisasid: 2
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika			
4.17. Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika			
Juhendaja(d): lektor Külli Hovi, MSc ja lektor Mart Hovi, MSc			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2021			
<p>Puitkütuse põletamisel tekkivad sadestised mõjutavad küttepindade soojusvahetust. Töö eesmärgiks on teada saada puitkütuselisandi kaoliini mõju veetorukatla küttepindadele. Töös kasutatakse AS Anne Soojuse koostootmisjaama veetorukatla küttepindade ja suitsugaaside temperatuure, viiakse läbi kaoliiniga ja kaoliinita tuha katsetus ahjus temperatuuril 1000 °C ja käsitletakse teadusuuringutes saadud tulemusi. Tuvastati küttepindade ja suitsugaasi temperatuuride erinevused kahel erineval aastal, kus kasutati kaoliini ja kus mitte. See tähendab, et küttepinnad on puhtamad ja soojusvahetus parem. Kaoliiniga ja kaoliinita tuha katsetamisel 1000 °C ahjus oli kaoliiniga tuhk terastopsiku pinnaga vähem seotud kui kaoliinita tuhk, mille sadestised olid silmnähtavad. Eelnevalt on uuritud kaoliini lisamist puiduga põletamisel väikestes kateldes. Bioflex! uuring näitas, et atmosfääri jõudev tahkete osakeste hulk ja vingugaas on vähenenud. Rootsi Chalmersi tehnikaülikooli uurimus aga leidis, et kaoliin on tõhus absorbent igasugustele kaaliumühenditele, mis vähendab puidu põletamisel küttepindadele tekkivaid kaaliumsooli.</p>			
Märksõnad: kaoliniit, suitsugaas, absorbent			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Ott Martens		Curriculum: Engineering	
Title: Effects of Kaolin to the Heating Surfaces of Boiler			
Pages: 42	Figures: 26	Tables: 1	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17 Energetic Research T140 Energy research Supervisors: Külli Hovi ja Mart Hovi Place and date: Tartu 2021			
<p>The deposits that are created in the process of burning wood fuel affect the heat exchange of heating surfaces. The purpose of this paper is to find out the effect of kaolin, an additive in wood fuel, on the heating surfaces of water tube boilers. In the paper, the temperatures of heating surfaces and flue gases of a water tube boiler are taken from the cogeneration plant of AS Anne Soojus, a test on the ashes with kaolin and without kaolin in a 1000oC furnace is conducted, and the results of scientific research are addressed. The differences in the temperatures of heating surfaces and flue gases over two years were measured, depending on whether kaolin was used or not. This means that the heating surfaces are cleaner and the heat exchange is more efficient. Testing the ashes with and without kaolin in a 1000 °C furnace showed that the ash with kaolin was less attached to the surface of the steel cup, while the ashes without kaolin showed noticeable depositions. Previous studies have looked at the addition of kaolin to wood fuels in small boilers. The “Bioflex!” research showed that the amounts of solid particles and carbon monoxide reaching the atmosphere have decreased. The research of the Chalmers University of Technology in Sweden showed that kaolin is an efficient adsorbent to different types of potassium compounds, which lowers the amount of potassium salts depositing on heating surfaces during wood combustion.</p>			
Keywords: kaolinite, flue gas, absorbent			

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	5
SISSEJUHATUS	6
1. ÜLDINE	7
1.1. Soojuse ja elektri koostootmine.....	7
1.2. Biokütuste omadused põlemisel	8
1.3. Küttepinnad	11
1.3.1. Küttepindade saastumine	11
1.3.2. Küttepindade puhastamine	12
1.4. Kaoliin	16
2. AS ANNE SOOJUSE KOOSTOOTMISJAAM	17
2.1. Üldised andmed	17
2.2. Biokütuste põletamise mõju küttepindadele võrreldes enne ja pärast kaoliini kasutuselevõttu	18
2.2.1. Kaoliini kasutamine kütuselisandina	18
2.2.2. Kaoliini lisamise tehnoloogia	20
2.2.3. Enne ja pärast kaoliini kasutuselevõttu	22
3. KAOLIINIGA KATSETAMINE	26
3.1. Nabertherm P 330 ahju programmeerimine	27
3.2. Kaoliini ja puidutuha kuumutamine ahjus.....	28
3.3. Kaoliiniga ja kaoliinita tuhatopsikute omavaheline võrdlemine	29
3.4. Katse järelendus	33
KOKKUVÕTE	35
KASUTATUD KIRJANDUS	37
LISAD	39
Lisa 1. Fotod töötavast katlast	40
Lisa 2. Lihtlitsents	42

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

DHE 1 - Kaugküttevee ülessoojendamiseks mõeldud soojusvaheti nr. 1

DHE 2 - Kaugküttevee ülessoojendamiseks mõeldud soojusvaheti nr. 2

DHE 3 - Kaugküttevee ülessoojendamiseks mõeldud soojusvaheti nr. 3

STC – väikesemahuliste tehnoloogiate sertifikaadid

SISSEJUHATUS

Viimase aastakümne jooksul on hakatud üha rohkem tähelepanu pöörama globaalsele soojenemisele. Seda tõendab ka 2015. aastal Pariisi kliimakonverentsil vastu võetud kokkuleppe, mille eesmärgiks on kliima soojenemise pidurdamine ning kasvuhoonegaaside vähendamine [1]. Üheks meetmeks, kuidas vähendada õhusaastust, on energiasektoris taastuvkütuste kasutamine soojus- ja elektrienergia koostootmiseks, mis muutub võimalikuks kui katelt käideldakse kindlatel, tootja poolt määratud põlemisrežiimidel. Koostootmine vähendab süsinikdioksiidi ehk süsihappegaasi kogust, mis on üks neljast kasvuhooneefekti põhjustavast gaasist [2, 3].

AS Anne Soojuse koostootmisjaama näitel saab uurida kaoliini mõju veetorukatla küttepindadele. Alates 2021. aastast kasutatakse aastaringselt kütmiseks ainult puitkütust, mis tekitab põlemisel eralduvate osakestega küttepindade saastumise ning raskendab nende puhastamist. Soojusvahetuspiindade puhtamana hoidmine on igapäevane tegevus, sest kütmissprotsess on pidev. Kaoliini lisamiseni puitkütusele jõuti 2018. aastal, sest seniajani olid katsetatud, kas see on tõhus. Alguses kasutati kaoliinikotte, mida katlamajas vahetuse operaator iga kahe tunni tagant valas kütusekonveierile, mis viib kütuse katlasse. 2020. aasta teises pooles konstrueeriti ja automatiseeriti kaoliini lisav süsteem.

Bakalaurusetöö eesmärgiks on uurida puitkütuselisandi kaoliini mõju küttepindadele, mis näitaks kas selle kasutamine on õigustatud ehk kas küttepinnad püsivad puhtamana. Lõputöö eesmärgist lähtuvalt püstitati järgnevad uurimisküsimused: kuidas kaoliin mõjub küttepindadele ning kas on küttepindadel ja suitsugaasidel temperatuuride vahe enne ja pärast kaoliini lisamist.

Töö on jagatud kolme etappi: esimene osa annab ülevaate soojuse ja elektri koostootmisest, biokütuste omadustest põlemisel, küttepindade saastumisest ja puhastamisvõimalustest ning kütuselisandist kaoliinist, teises osas on AS Anne Soojuse koostootmisjaama näitel kaoliini kasutamine ja kolmandana toimub kaoliiniga katsetus koos tuhaga temperatuuril 1000 °C ning seejärel analüüsitakse saadud tulemusi.

1. ÜLDINE

1.1. Soojuse ja elektri koostootmine

Üks keskkonnasõbralikumaid energia tootmise viise on koostootmine, mis võimaldab sama energiaga toota nii soojust kui ka elektrienergiat. Koostootmise käigus taaskasutatakse jääksoojust paljude süsteemide tööprotsessides ära, mille tulemusena jõuab korstna kaudu atmosfääri maha jahutatud suitsugaas, mis sisaldab vähesel määral lämmastikoksiide, lämmastikdioksiidi, süsinikmonoksiidi, tolmu ja teisi metalle, näiteks arseeni ja elavhõbedat, mille osakaal on minimaalne ja keskkonnale ohutu [4: 740]. Ka Eestis on soojuse ja elektri koostootmine levinud, tuntumad neist Iru, Vão, Pärnu ja Tartu koostootmisjaamad. Iru koostootmisjaam on neist suurim oma elektrilise võimsuse 207 MW ja soojusliku võimsuse 698 MW poolest [5]. Kütuseks sobib koostootmiseks nii vedel-, gaas- kui ka tahkekütus, näiteks biokütus, segaolmejäätmed ja maagaas.

AS Anne Soojuse koostootmisjaama soojus- ja elektrienergia tootmise käigus siseneb tahkekütus kütuse etteandesüsteemi abil koldesse, mis umbes 850 °C juures hetkega süttib. Kolde ümber paiknevad ekraanitorud ehk soojusülekanne jaoks mõeldud torud, mida läbib eelnevalt töödeldud ehk demineraliseeritud vesi, mis kuumade suitsugaaside tõttu aurustub ning liigub aurutrumlisse. Pärast trumlit liigub aur läbi primaar ja sekundaar õhuelesoojendi, mis aitab väljast tulevat õhku soojendada, et oleks põlemisõhuks sobiv temperatuur. Aur liigub edasi läbi primaar, sekundaar ja tertsiaal ülekuumendite, mis on mõeldud auru ülekuumendamiseks, saavutades turbiini jaoks vajaliku 525 °C temperatuuri. Turbiini siseneb kõrgsurveaur, mis hoiab töös turbiinilabasid, et turbiin pöörleks. See omakorda on ühendatud generaatoriga, mis toodab elektrienergiat. Tegemist on auru tootva katlaga, see tähendab, kui turbiini koormust vähendada langeb ka soojusliku tootmise võimsus. Turbiini töötamisest jääb üle jääkaur, mis juhitakse soojusvahetitesse DHE 1 ja DHE 2 ning mida kasutatakse linnast tagasituleva maha jahtunud kaugküttevee soojendamiseks. Kui turbiin ei tööta, siis on võimalik endiselt teatud võimsusel toota auru ning kasutada seda soojusvaheti DHE 3-s kaugküttevee soojendamiseks.

Soojus- ja elektrienergia koostootmise üheks eesmärgiks on hoida tootmise kasutegur kõrgel ehk kasutada võimalikult palju energiat ära ning mitte lasta seda korstna kaudu atmosfääri. See säästab keskkonda, hoides ära suurel määral kahjulike heitmete pääsemise õhku. Selleks on kasutusele võetud jääksoojuse kasutamine erinevates katla soojustootmise etappides, näiteks suitsugaasipesuris, mis sõltuvalt biokütuse niiskusest annab lisatootlikust ja jahutab samal ajal suitsugaase, mille tulemusena on vähendatud keskkonda kahjustavat toimet.

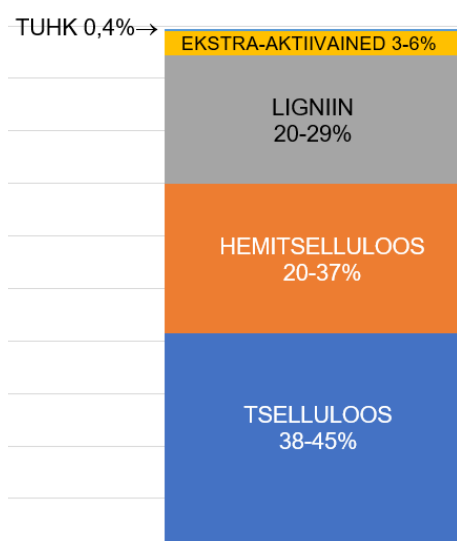
Soojus- ja elektrienergia koostootmine on ka mujal maailmas levinud, peamiselt tänu keevkihtpõletustehnika arenguga, sest tema eelised tekivad intensiivsele massiülekandele, mis on tekitatud tahkete osakeste liikumisega [4: 50]. Põhiliselt on edu saavutatud laboratoorselt, matemaatilistel mudelitel ja pooltööstuslikel seadmetel [4: 50]. See annab palju informatsiooni, et keevkihtpõletus funktsioneeriks tõhusalt ning saadud energia oleks võimalik muundada kaheks erinevaks energiaks, soojuseks ja elektriliseks [4: 50]. Kevvkihi jõuline areng algas seitsmekümnendate keskel, esialgu Nõukogude Liidus, Saksamaal ja pärast tulid kasutusele Soomes, Hiinas, USA-s ja teistes riikides, mis on aluse pannud sellisel kujul energiate koostootmisele [4: 51]. Tänapäevaseks näiteks on Saksamaal asuv Berlin-Marzahn koostootmisjaam, kus soojuslik võimsus on 230 MW, elektriline võimsus 270 MW ja kütusesäästlikus üle 90% [6]. Teise näitena võib tuua Fortum Värme, mis asub Stockholmis, selle jaama tootmisvõimsus on 130 MW elektri-, 280 MW soojuslik [7].

1.2. Biokütuste omadused põlemisel

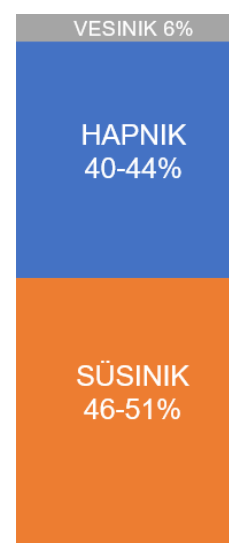
Tänapäeval leiavad üha enam aktuaalsust teemad, mis on seotud globaalse soojenemisega. Seetõttu kasutatakse energiate koostootmiseks kütusena alternatiivkütuseid, näiteks puidujäätmeid [8]. Selleks, et katlasse saaks siseneda puitkütus, peab kolle saavutama teatud kõrge temperatuuri. Milleks kasutatakse katla käivitamisel põleteid, mis tarbivad kütusena maagaasi. Maagaas ei liigitu taastuvkütuste alla. Biokütus, sealhulgas näiteks biogaas ja puidujäätmed liigituvad taastuvkütuste alla [4: 193]. Biokütus on bioloogilist päritolu, mis tekib elusorganismide elutegevuse tagajärjel [4: 193]. Need liigituvad omakorda puidupõhisteks ja rohtseteks, puidupõhised on puit ja puiduga seonduv ning rohtsed on põhk,

pilliroog ja teised [4: 193]. Biokütustes on orgaaniline osa, mineraalosa ja niiskus [4: 193]. Orgaanilise osa moodustavad süsiniku, vesiniku, hapniku, lämmastiku ja väävli kõrgmolekulaarühendid [4: 175]. Mineraalosa on kütuse erinevate mineraalühendite kooslusest, mis hapnikuga ei ühine, kuid võib mõjutada põlemist [4: 176]. Kolmas osa on biokütustes niiskus, see jaguneb väliseks ja sisemiseks niiskuseks [4: 178]. Väline niiskus eemaldub kütusest kui õhukeskkond on kuiv [4: 178]. Sisemist niiskust nimetatakse hügrokoopseks, see eemaldub täielikult üle 100 °C juures [9: 24]. Peale eelnevalt nimetatud kütuseosade, sisaldub kütuses vett mineraalides kristallvee kujul, mis eraldub alles kõrgel temperatuuril [4: 178]. Sellisteks mineraalideks kütuses on kaoliniit, limoniit, muskoviit, kips ja teised, kuid nende osatähtsus kütuses on vaid 1-2% [4: 178]. Sagedamini esineb tahkekütuses savimineraalidest kaoliniit, muskoviit ja montmorilloniit [4: 178]. Kaoliniidi sulamistemperatuur on 1810 °C [4: 178].

Peamiselt on levinud puitkütuste kasutamine koostootmises, sest rohtsete kütuste põletustehnoloogiad pole niivõrd levinud. Puitkütuseid iseloomustab see, et puutüvede koostisest (joonis 1.1) 38-45% on tselluloos, 20-37% hemitselluloos, 20-29% ligniin, 3-6% ekstra-aktiivained ja tuhk 0,4%. Puitkütus on lendainerikas, sisaldab lisaks muule ka väävlit, lämmastikku ja kloori. Puuliikide elementkoostisest teeb 46-51% süsinik, 40-44% hapnik ja 6% vesinik. [4: 193]



Joonis 1.1. Erisuguste puutüvede koostis [4: 193].



Joonis 1.2. Erinevate puuliikide elementkoostis [4: 194].

Puitkütuste efektiivne põlemine katlas on seotud selle koostisega, kui palju on tüvepuud, tüve koort, värsked oksid, oksid, lehti ja juuri [9: 17]. Puidus on suurema osakaaluga tüvepuu, mis annab kõige rohkem biomassienergiat [9: 17]. Enne puitkütuse põletamist tuleb seda töödelda, et see ei ummistaks kütuse etteandesüsteemi [9: 20]. Selleks puit hakitakse ning seejärel puiduhaket vedav veoauto laeb hakke katlamaja kütusekonveierile või otse kütuselattu, et katlal toimiks pidev kütuse etteandmine. Kui puitkütus siseneb koldesse, siis süttib see umbes 850 °C kuumuses hetkega. Sellest üks osa tekitab soojusenergiat ning teine osa, mis jääb üle, tahket jääki ehk tuhka [9: 37]. Puidu tuhasus on minimaalne [4: 193]. Kui koldes ei ole piisavalt õhku, siis osa süsinikust võib jääda põlemata ning tekitada katla järelküttepindadele sadestisi [9: 37], mis häirib katlal stabiilset tööd ja vähendab tööiga [9: 38].

1.3. Küttepinnad

1.3.1. Küttepindade saastumine

Küttekolde töötamisega kaasnevad energiatootmise kvaliteeti pidurdavad nähtused, millega tuleb aegsasti tegeleda põlemiseefektiivsuse langemise ennetamiseks ning katla konstruktsiooniosade tööväime säilitamiseks. Puit kui üks biokütustest sisaldab ka fenoole, tõrva ja vaike, mis võivad tekitada raskesti eemaldatavaid sadestisi [10: 4]. Väävel ja kloor on katla korrosiooni tekitatavateks komponentideks, mis saastavad madalatemperatuurilisi suitsukäike ja korstna pindu [9: 39]. Lisaks eelnevale sisaldab puit ka vähesel määral raskeid metalle, näiteks niklit, kaadmiumi, elavhõbedat, tsinki ja pliid, ka nendel on oma oluline roll küttepindade saastumisel [9: 40]. Biokütuste, sealhulgas puidu, tuhasisaldus on madal, kuid seegi mõjutab katla töötamist [9: 32]. Tuha sulamise korral võivad tekkida kõrgetemperatuurilistele ja konvektiivküttepindadele tugevad sadestised [9: 32]. Põlemisrežiimide jälgimine on oluline, sest saepuru ja puiduhakke tuhal on märgatavalt madalamad pehmenemistemperatuurid ning needki võivad tekitada tahmumist [9: 38].

Koostootmisjaamades on levinud keevkihtpõletustehnika, mis aitab ära hoida kolde šlakkumist ja tuha sulamist, sest temperatuurid on madalad, umbes 750-900 °C [9: 75].

1.3.2. Küttepindade puhastamine

Küttepindade puhastamiseks on kaks võimalust. Esimese lahenduse korral jäetakse katel seisma ning viiakse läbi põhiküttepindade sügavpuhastus. Teise võimaluse korral ei seistata katelt, vaid puhastatakse töötavat katelt, mis pikendab selle töövõime pikkust ning tõhusust. Teise võimaluse eeliseks on see, et ei pea katelt kütteperioodi ajal seiskama, sest jahtumise ja ülessoojendamise temperatuuride erinevus on suur ning see mõjub ebasoodsalt katla konstruktsioonile. Selleks, et katelt rutiinselt puhastada, kasutatakse mitmeid tehnoloogiaid. Tänapäeval on enamlevinud meetoditeks puhumine õhu ja auruga, puhastamine veekahuritega, gaasi- ja õhusegu plahvatusega ning akustilise ehk helilainetega puhastus [11, 12]. Pidev küttepindade puhtamana hoidmine toimub lisaainete lisamisega ning samuti jälgitakse kütuse omadusi, näiteks niiskust.

AS Anne Soojuse koostootmisjaama näitel auruga puhumise meetodit nimetatakse tahmapuhuriteks, mis on mõeldud nii auruülekuumendite, ökonomaiseri kui ka suitsugaasi õhuelsoojendite soojusülekandepindade puhastamiseks [13]. Võrreldes muude katlapuhastuse meetoditega kasutatakse tahmapuhurite tehnoloogiat ööpäevas vähemalt korra, vajadusel rohkem [13]. Selle kasutamise tarvidus sõltub kütuse omadustest ja katla koormusest [13]. Lisaks eelnevale saab lähtuda sellest, et kui väljuvate suitsugaaside temperatuur tõuseb ülemäära kõrgeks ja tõmme väheneb, siis küttepinnad vajavad puhastamist [13]. Tahmapuhurites kasutatakse madalsurveauru, mida saadakse kõrgsurveauruna põhiülekuumendite vahelt ja alandatakse rõhualandusventiili abil [13]. Tahmapuhur funktsioneerib järgnevalt: aurutorusse siseneb aur madalsurvel, mis liikuva võlliga keereldes liigub katlasse, seejärel kui lõppasend on võllil saavutatud, pöörleb tagasi algasendisse [14]. 15 tahmapuhurit töötavad kindlas järjekorras, ühe tahmapuhuri tsükli aeg on keskmiselt 3,5 minutit ja kogu puhurite peale kuluv aeg on umbes 50 minutit. Madalsurveaur annab soojusülekandepindade puhastamiseks tulemust, mis võimaldab katla

tööiga pikendada ja ummistusprobleeme vältida. Aur, millega puhastatakse katla küttepindu, ei haihtu, vaid see püütakse kinni suitsugaasipesuris ning selle tulemusel saadakse soojusenergiat. Näitena toodud koostootmisjaama kasutatakse lühemaid tahmapuhureid ökonomaiseri ja õhuelsoojendite soojusülekandepindadele (joonis 1.3) ning pikemaid ülekuumenditel (joonis 1.4), see sõltub suitsugaaside temperatuuridest, kas need vajavad täielikult väljatõmbamist või mitte [13]. Ökonomaiseri on mõeldud soojusvahetina enne aurutrumlit vee soojendamiseks põlemisgaaside abil [13].

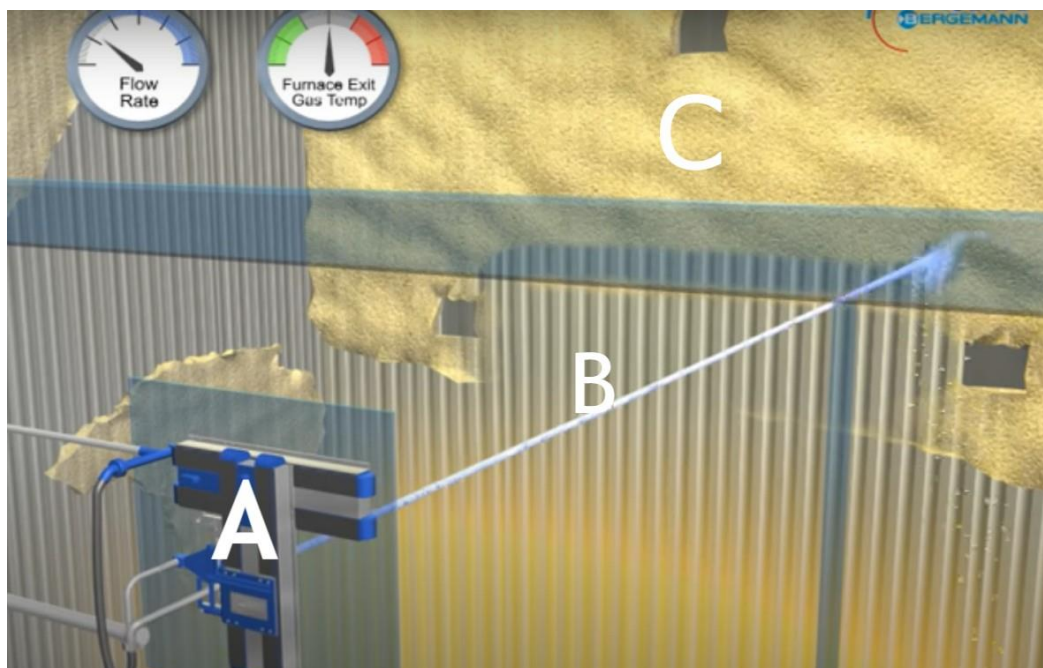


Joonis 1.3. AS Anne Soojuse koostootmisjaama katla ökonomaiseri ja suitsugaasi õhuelsoojendi tahmapuhur.

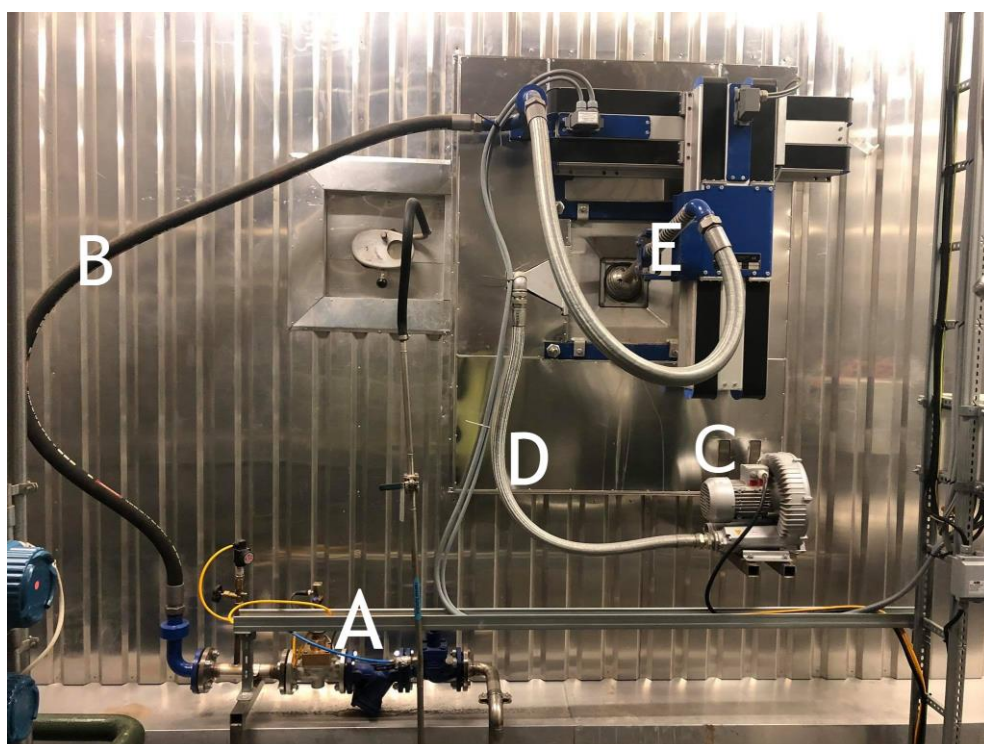


Joonis 1.4. AS Anne Soojuse koostootmisjaama katla auruülekuumendi tahmapuhur.

Peale tahmapuhurite kasutatakse veekahurite tehnoloogiat, mis on olemas AS Anne Soojuse veetorukatlal (joonis 1.5). Üks tootjatest, Smart Cannoni on tulnud välja veekahurite tehnoloogiaga, mis funktsioneerib järgnevalt: veejuga viiakse tugeva surve abil vastu katla vastasseina, mis visuaalselt on välja toodud joonisel (joonis 1.6) [15].



Joonis 1.5. Kuvatõmmis videost Smart Cannon veekahuri funktsioneerimise põhimõttest. Joonise selgitus: A - veekahuri tehnoloogia, B - veejuga, C - sadestised katlas. [15]

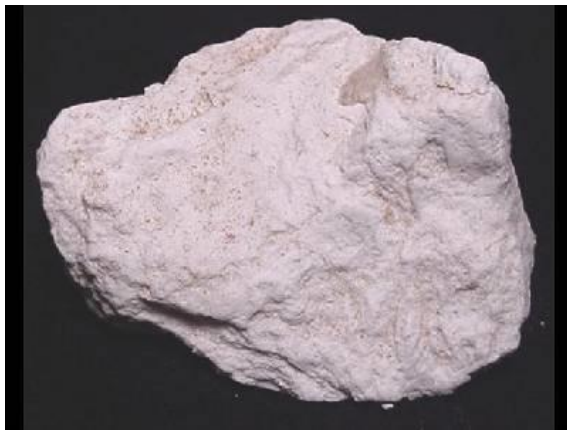


Joonis 1.6. AS Anne Soojuse koostootmisjaama katla ekraanitorude puhastamiseks mõeldud veekahurite tehnoloogia. Joonise selgitus: A - veesüsteem ehk vesi peale, B - veetoru, C - jahutusventilaator, D - jahutusventilaatoritoru, E - veejoapüstol.

Peamiseks veekahurite eeliseks on see, et need suudavad võrreldes tahmapuhurite 30% puhastamise efektiivsusega suurendada katlaseintelt saastumise eemaldumist 90%-ni, mis aitab parandada soojusülekannet, katel suudab töötada stabiilselt etteantud võimsusel [15]. Seda meetodit kasutatakse vastavalt vajadusele. Pidevalt käib jahutusventilaator, mis jahutab veejoapüstolit, et see üle ei kuumeneks. Kui põletatakse ainult hakkpuitu, siis on nõutud antud protsessi läbiviimine korra kuus, kui kütuse hulgas on turvas ning puit koos, siis seda vajadust ei esine, sest turbas on mineraaliosa olemas, mis aitab ära hoida suures osas küttepindade tahmumise [4: 198]. Tihe katla puhastamine veekahuritega tekitab katlale termošoki, mis lõhub selle seinu ning häirib põlemisprotsesse.

1.4. Kaoliin

Kaoliin on portselansavi, mida kasutatakse keraamikatööstuses, kosmeetikas ja teistes valdkondades, seda on odav kasutada [16]. Kaoliin, mida leidub looduses, sisaldab erinevaid mineraale, milleks on kaoliniit, muskoviit, päevakivi või anataas [16]. Kaoliini kaevandatakse Hiinas, Ukrainas, Suurbritannias, Prantsusmaal, USA-s ja teistes kohtades. Nimi pärineb Hiina Caolingi külast, kus kaevandati esimest korda kaoliini [17]. Eestisse seda imporditakse [17]. Kaoliin koosneb peamiselt kaoliniidist, mis on savimineraal [17]. Kaoliniit kuulub kaoliniidi-serpetiini rühma koos *dickite*-ga, halluasiidiga ja *nacrite*-ga [18]. Seda on mitut sorti, näiteks rohelist rauarikast ja kroomi sisaldavat kaoliniiti [18].



Joonis 1.7. Kaoliniit. [18]

2. AS ANNE SOOJUSE KOOSTOOTMISJAAM

2.1. Üldised andmed

AS Anne Soojuse koostootmisjaam käivitati 2009. aastal (joonis 2.1). Jaamal on elektriliseks võimsuseks 25 MW ja soojuslikuks võimsuseks 50 MW. Lisaks sellele on jaamale loodud lisaväärtust suitsugaasipesuri näol, mis annab soojusenergiat juurde 15 MW. [19]



Joonis 2.1. AS Anne Soojuse koostootmisjaam. [20]

Kütusteks on puiduhake ja freesturvas, viimase osakaal on sellest aastast langenud, sest turvas ei kuulu taastuvkütuste hulka. Katlaks on Metso Power OY poolt toodetud veetorukatel, mille auru temperatuur on 525 °C, rõhk süsteemis 115 bar ja auru kulu täiskoormusel 29 kg/s. Kuna tegemist on aurukatlagi, siis turbiini koormuse vähenemisel muutub väiksemaks ka auru kulu ja selle võrra väheneb kogu katla soojatootlikus.

Auruturbiin ja generaator on toodetud Siemensi poolt. Planeeritud elektritoodang aastas on 158 GWh, soojustoodang 304 GWh. [19]

2.2. Biokütuste põletamise mõju küttepindadele võrreldes enne ja pärast kaoliini kasutuselevõttu

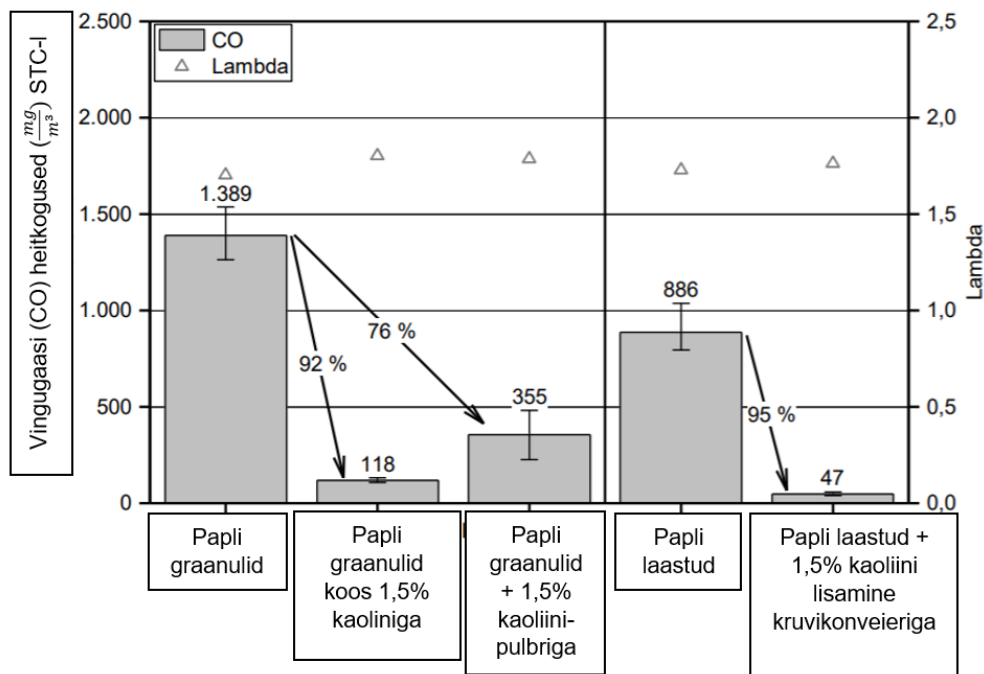
Puiduhaket kasutatakse ainukese kütusena kevad-suvi-sügisperioodidel, see annab võimaluse võrrelda omavahel kaoliinile eelnevat aega ja pärast kasutuselevõttu. Kaoliin võeti kasutusele paar aastat tagasi. Digitaalselt salvestuvad andmed süsteemide väärtustest arhiivi, mis võimaldab uurida kaoliinile eelnevat ning praegust aega ja neid omavahel võrrelda. AS Anne Soojuse veetorukatla küttepindu saab vaadelda vaateavadeist nii ülekuumendite kui ka koldeosas (lisa 1), need annavad selgema pildi töötava katla sisemusest.

2.2.1. Kaoliini kasutamine kütuselisandina

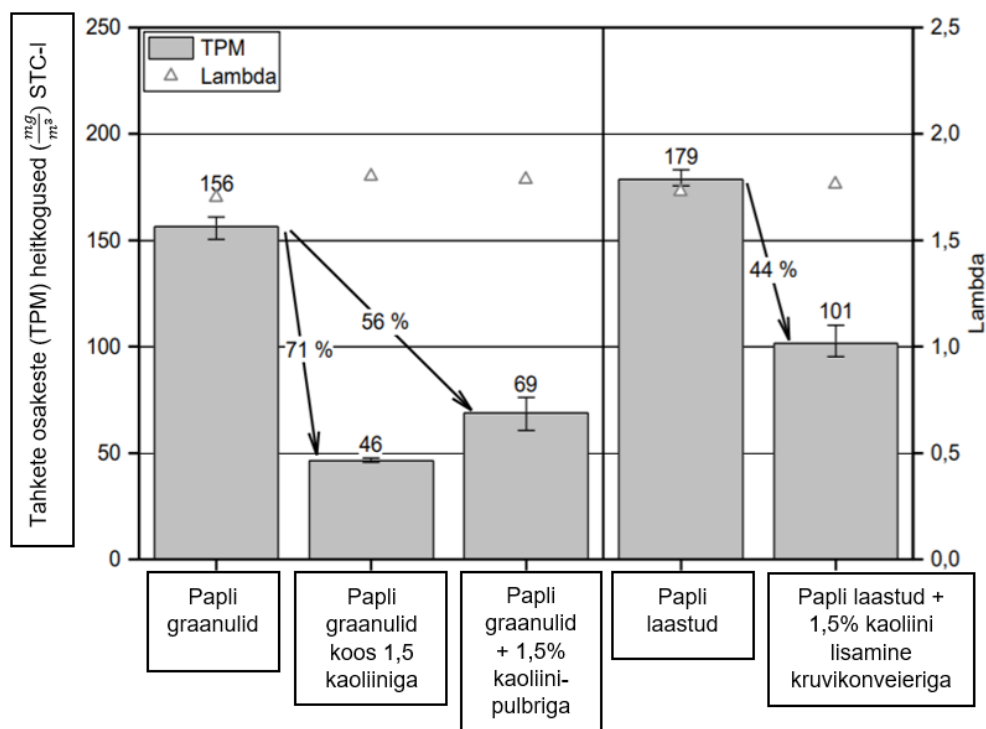
AS Anne Soojuse veetorukatel, mis on toodetud Metso Power OY poolt, kasutab kütuselisandina kaoliini, mida lisatakse umbes 0,2 % kütuse kogumahust. Arvutus saadi järgnevalt: jaamaoperaator pidi valama kaoliini ise kütusele juurde, selleks kasutati 25 kilogrammiseid kotte, mida lisati ööpäevas 30 tükki. Katla täisvõimsusel töötamisel põletab 338,4 tonni kütust, millest 750 kilogrammi on umbes 0,2 %. Peale seda kui kaoliin on lisatud, liigub konveieril kütus koos kaoliiniga päevasilosse, kus seguneb ning seejärel liigub läbi sulgursöötja katlasse. Katlas hoiab see ära puitkütuse põlemisel tekkiva tuhaosakeste haakumise tugevasti küttepindadele ning igapäevasel puhastamisel tahmapuhuriga või kuus korra veekahurite süsteemil oleks võimalik katlaküttepindu puhtamaks saada. Kaoliin on mineraal, mis sisaldab minimaalselt kõrvalaineid, andes puitkütuse põlemisele lisaväärtust, et katla soojusvahetuspinna püsiks võimalikult puhtana ja toimuks maksimaalne soojusvahetus.

Puitkütuste põletamisel tekivad pindadele tugevad sadestised, mida põhjustavad kaaliumsoolad. Kaoliin on näidanud olema tõhus absorbent erinevatele kaaliumiühenditele, mis on ka üheks põhjuseks, miks seda kütuselisandina kasutatakse. Rootsi Chalmersi tehnikaülikoolis uuriti lendtuha omadusi, kus kaoliini kasutati lisandina. See uuring näitas, et kaoliin aitab vähenedada tekkivaid probleeme, nagu näiteks küttepindade tugevate sadestiste teket. Kaoliini kasutamine ei mõjuta tuhaomadusi, mis takistaksid selle kasutamist mineraalväetisena metsanduses. [21]

Kaoliinisavi koosneb enamasti kaoliniidist. Kaoliin muundub olenevalt kraadidest erinevalt. 450-600 kraadi juures toimub dehüdroksüülimine, kus kaoliniit kaotab vett ja muutub seejärel meta-kaoliiniks, mis on amorfse alumiiniumsilikaadi tüüp ning reageerib tõhusalt gaasiliste leeliseliikidega. Edasisel kuumutamisel umbes 980-1100 kraadi juures muutub meta-kaoliin spineli struktuurini. Bioflexi uurimisprojektis viidi läbi katse, kus kasutati papli põletamisel kaoliini. Esimesel (joonis 2.2) ja teisel (joonis 2.3) graafikul on välja toodud vingugaasi ja tahkete osakeste hulk enne ja pärast kaoliini lisamist papli hulka. [22]



Joonis 2.2. Vingugaasi (CO) heitmete erinevus kaoliini kasutamisel ja mitte kasutamisel [22].

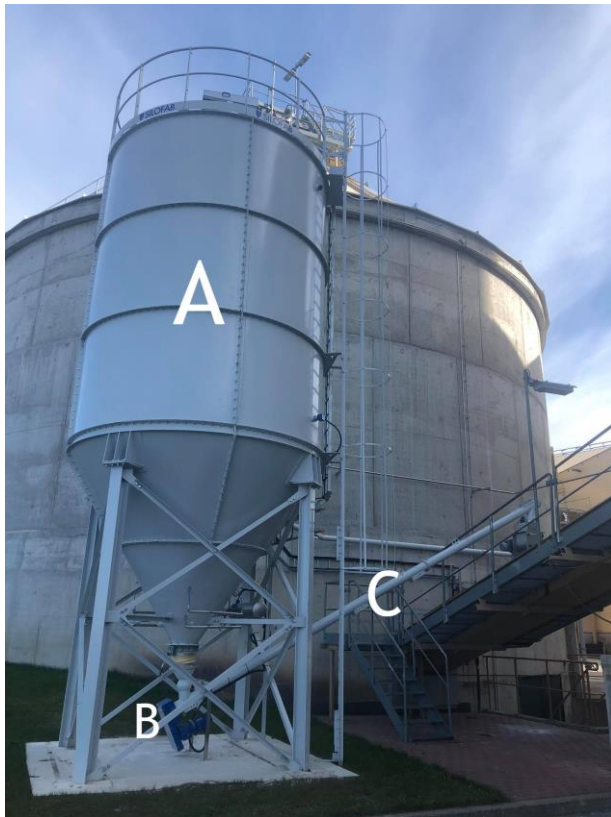


Joonis 2.3. Tahkete osakeste heitmete erinevus kaoliini kasutamisel ja mitte kasutamisel [22].

Graafikutel olev lambda väärtus näitab soojusjuhtivust, mida suurem arv seda rohkem toimub soojuse levimist. Bioflexi katse näitas, et vingugaas ja tahkete osakeste hulk vähenes, see tähendab, et atmosfääri jõuab vähem vingugaasi ja tahkeid lenduvaid osi. [22]

2.2.2. Kaoliini lisamise tehnoloogia

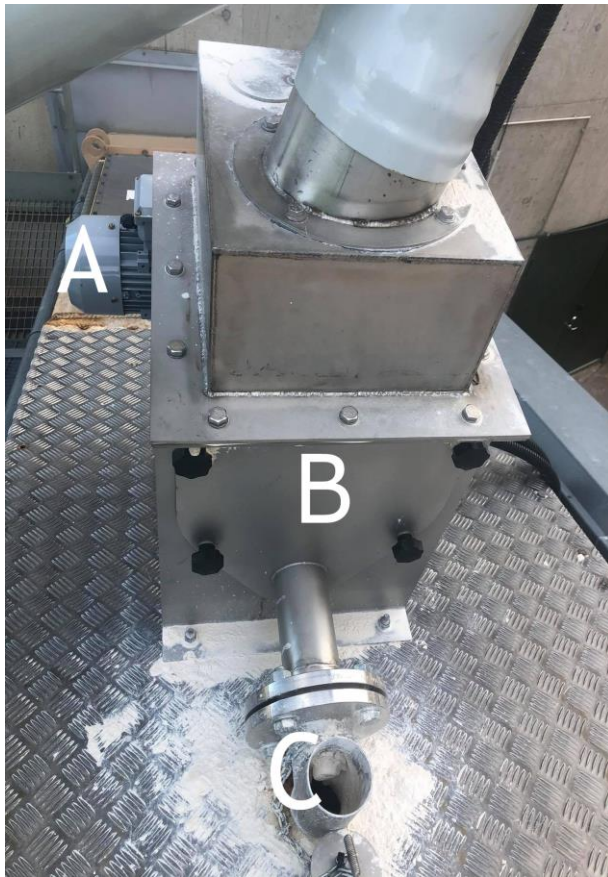
Kaoliini lisamise protsess algab kaoliini transportiva paakautoga, mis täidab kaoliinimahuti (joonis 2.4), seejärel tigukonveier teeb (joonis 2.5.) iga 79 minuti tagant 1,5 minutilise töötamise tsükli, täites väikest toitjat, mille sees on mikrosegaja, et niiskem kaoliin ei jääks seinte külge ja ei tekiks ummistusprobleeme. Hiljem kui toitja (joonis 2.6) on vajaliku taseme ehk nivoo saavutanud, hakkab tööle mikrotigu, mis juhib kaoliini kütuse etteandesüsteemi. Mikrotigu töötab iga 17,5 minuti tagant 2,5 minutit. Need ajavahemikud on arvutatud katla ööpäevase koormuse järgi.



Joonis 2.4. Kaoliini lisamise mahuti ja tigukonveier. Joonise selgitus: A - kaoliinimahuti, B - tigukonveieri mootor, C - tigukonveier.



Joonis 2.5. Kaoliini lisamise tigukonveier koos toitjaga. Joonise selgitus: A - tigukonveier, B - toitja, C - täitmissüsteemitoru.



Joonis 2.6. Mikrotoitja koos -teoga. Joonise selgitus: A - segajamootor, B - mikrotoitja, C - mikrotigu.

Kaoliinimahuti on varustatud ka filtriga, mis eemaldab lisaõhu mahutist. Lisaõhk satub sinna kaoliinimahuti täitmisel paakautost. Suure mahuti töökorras hoidmine on lahendatud suruõhuga, näiteks pneumovasara ja aereerimisega, et mahuti seintele ei jääks kaoliini ja protsess ei vajaks pidevat sekkumist. Iga vahetuse operaator on kohustatud kontrollima, et mikrotigu töötaks ning ei oleks tekkinud ummistusprobleeme, mis tuleb vajadusel likvideerida.

2.2.3. Enne ja pärast kaoliini kasutuselevõttu

Üks võimalus, võrdlemaks küttepindu enne ja pärast kaoliini kasutuselevõttu, on kasutada andmebaasist saadud küttepindade ja suitsugaaside temperatuure (joonis 2.7).

Võrreldavateks kuudeks oli 2017. ja 2021. aasta aprillikuud, ajavahemik 30 päeva ja iga päev täpselt kell 5:00. Valik osutus aprillikuule, sest siis on katlal veel täiskoormus ja käib kütteperiood ning kütuseks kasutatakse ainult haket. Kindel kellaaja põhjus seisneb selles, et iga päev varahommikul viiakse läbi tahmapuhurite tsükkel, mis tähendab, et katel on töötavas olekus puhtaim. Samuti katla hooldusperiood toimub enamjaolt juunikuus ehk tööaeg on sama. Võrdluseks kasutati primaar, sekundaar õhueelsoojendite, primaar, sekundaar ja tertsiaal ülekuumendite ning kahte suitsugaasi temperatuuri. Õhueelsoojendite ja ülekuumendite soojusülekandepindade puhtust näitab, et mida kõrgem temperatuur seda puhtamad need on. Küttepindadele olevate tugevate sadestistega on suitsugaaside temperatuurid kõrgemad, sest soojusvahetuspind ei anna soojust edasi. Graafiliseks võrdluseks püstitati hüpotees: küttepindade kõrgemate ja suitsugaaside madalamate temperatuuride korral on kaoliini mõju olemas veetorukatla küttepindadele. Kui omavahel võrreldi 30-päevaseid andmeid, siis esialgu toodi t-testi jaoks välja kahe valimi keskmised ning arvutati standardhälbed, millest sai arvutada statistilise olulise määra. Tulemuseks saadi, et kuuest võrreldavast temperatuuriandurist viis olid statistiliselt olulised, sest P väärtus jäi alla 0,05. Statistiliselt mitteoluline oli suitsugaaside temperatuuri teine andur, mille P näit tuli 0,378. Nendest andmetest (tabel 1) saab järeldada, et muutus on toimunud ning kaoliini mõju olemas.

Standardhälvet kirjeldab järgnev valem [23]

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}}, \quad (2.1.)$$

kus s on standardhälve;

n – vastajate arv;

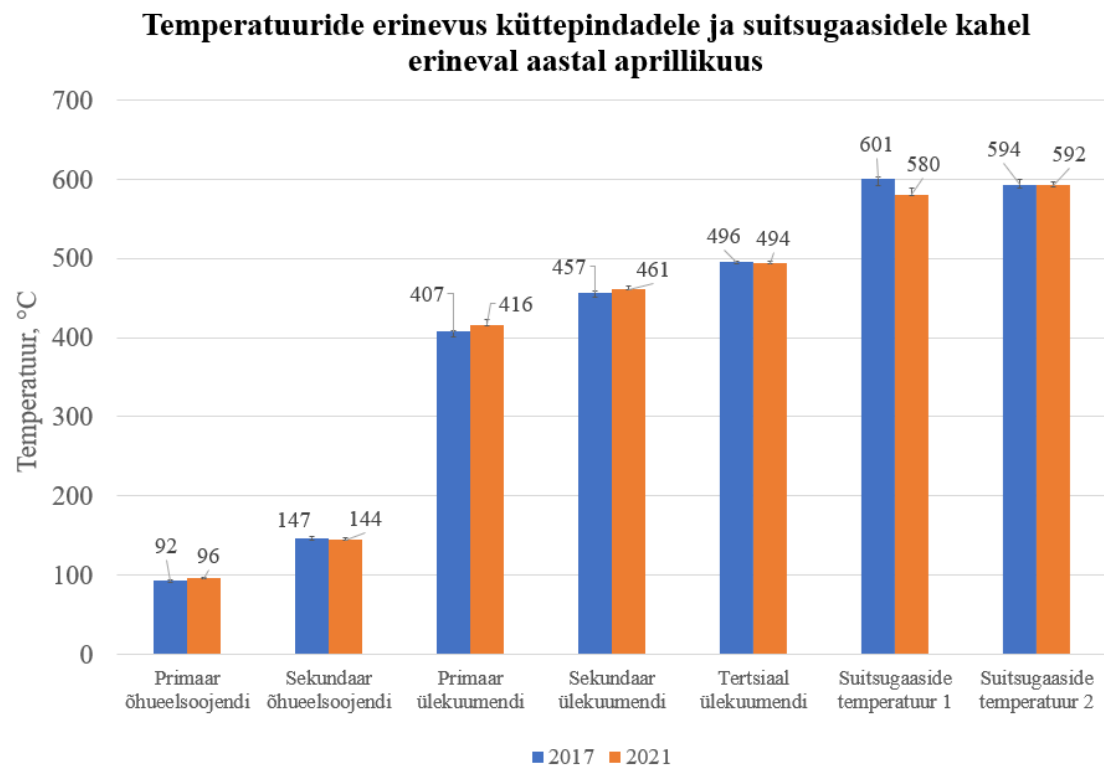
i – indiviidil;

x – tunnuse väärtus;

m – keskmine.

Tabel 1. Küttepindade ja suitsugaaside temperatuurid aprillikuus 2017. ja 2021. aastal

Nimetus	Keskmine temperatuur, °C	Standardhälve
Primaar õhueelsoojendi aprill 2017	92	0,7
Sekundaar õhueelsoojendi aprill 2017	147	1,6
Primaar ülekuumendi aprill 2017	408	2,0
Sekundaar ülekuumendi aprill 2017	457	2,1
Tertsiaal ülekuumendi aprill 2017	496	1,4
Suitsugaaside temperatuur 1 aprill 2017	601	2,4
Suitsugaaside temperatuur 2 aprill 2017	594	7,1
Primaar õhueelsoojendi aprill 2021	96	1,3
Sekundaar õhueelsoojendi aprill 2021	144	2,2
Primaar ülekuumendi aprill 2021	416	6,5
Sekundaar ülekuumendi aprill 2021	461	4,8
Tertsiaal ülekuumendi aprill 2021	494	2,1
Suitsugaaside temperatuur 1 aprill 2021	580	8,5
Suitsugaaside temperatuur 2 aprill 2021	592	5,1



Joonis 2.7. Temperatuuride erinevus enne ja pärast kaoliini kasutuselevõttu.

Soojusülekandepindade temperatuuride erinevus võib sõltuda millestki muust kui ainult kaoliini olemasolust. Võimalusteks on kütuste erinev kasutus, katla töötamise aeg ja muud probleemid, mis võivad põlemisel tekkida.

3. KAOLIINIGA KATSETAMINE

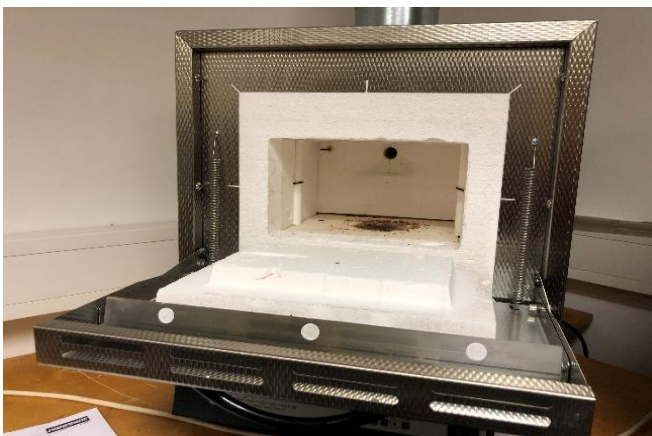
Katse eesmärk: Katse eesmärgiks oli luua võrdlusmoment peale kuumutamist 1000 °C ahjus tuha- ja kaoliinisegu topsiku ja kaoliinita tuhaga topsiku vahel.

Katse hüpotees: Tuha- ja kaoliinisegu topsik on peale katse sooritamist puhtam.

Katse kirjeldus: Katseks kasutatakse ahju, mille maksimaalne temperatuur tõuseb kuni 1000 °C. See on Naberthermi ahi, mille täpsem mudel P 330 (joonis 3.1 ja joonis 3.2).



Joonis 3.1. Nabertherm P 330 ahi.



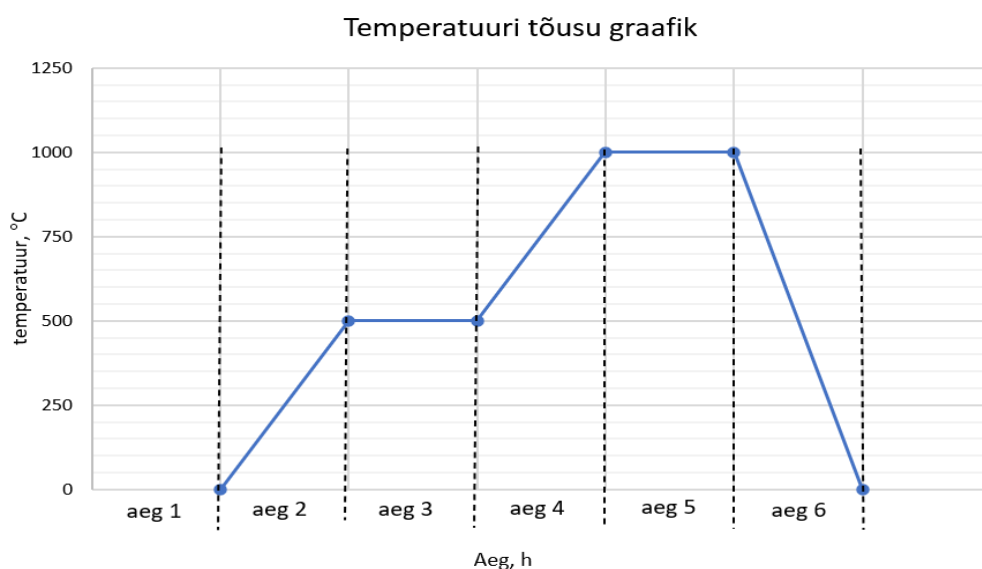
Joonis 3.2. Nabertherm P 330 ahi seestpoolt.

Katse tegemiskoht: Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katlalaboris.

Katse tegemise kuupäev: aprill 2021

3.1. Nabertherm P 330 ahju programmeerimine

Nabertherm P 330 ahju programmeerimiseks lähtutatakse vastavast graafikust (joonis 3.3), mis on ahju esipaneelil väljatoodud.



Joonis 3.3. Illustratiivne joonis ahju Nabertherm P 330 funktsioneerimise põhimõtte osas [23].

Katse jaoks seadistati see selliselt, et temperatuuri tõus ja langus oleks sujuv, sellepärast on mõeldud katla soojendamiseks ja jahutamiseks kindel aeg. Ahju seadistamine:

1. Aeg 1 – ooteaeg – katse jaoks seda ei vajatud,
2. Aeg 2 – aeg, mis kulub temperatuuri saavutamiseks – katse tegemisel 2 tunniga tõuseb 500 °C-ni,

3. Aeg 3 – aeg, mis hoiab saavutatud temperatuuri – katse tegemisel 2 tundi hoidis 500 °C,
4. Aeg 4 – aeg, mis kulub temperatuuri saavutamiseks – katse tegemisel 2 tundi tõuseb 1000 °C-ni,
5. Aeg 5 – aeg, mis hoiab saavutatud temperatuuri – katse tegemisel 1 tunni hoidis 1000 °C,
6. Aeg 6 – aeg, mis mõeldud ahju jahtumiseks – katse tegemisel loomulikul teel. [24]

Need temperatuurid valiti vastavalt katlapõhja temperatuuriandurite järgi, mis on koldes ligi 1000 °C.

3.2. Kaoliini ja puidutuha kuumutamine ahjus

Kui ahi oli seadistatud, seati valmis katseks neli terastopsikut. Kolmes neist olid kaoliiniga tuhk ja ühes kaoliinita tuhk (joonis 3.4). Tuhk oli saadud eelnevalt katlas põletatud lepuupest. Selleks, et oleks võimalik kaoliini ja tuha omavahelist tegelikku suhet katlas määrata, tuli teha arvutus. Kuna puukütuse tuhk on 1% kogu puukütuse koostisest ja kaoliini pandi Bioflexi katses 1,5% kütuse etteandesüsteemi, siis omavaheline suhe oli selline, et terastopsikusse üks pool läks tuhka ja teinepool kaoliini. Kaoliiniga tuhatopsik segati, et saada paremat tulemust, sest kui kütuse etteandesüsteemi kaoliini lisada, siis enne katlasse sisenemist on päevasilo, kus kaoliin kütusega seguneb.



Joonis 3.4. Tuha- ja kaoliinisegu topsikud enne ahju panemist. Joonise selgitus: kaoliinita tuhatopsik - A, kaoliiniga tuhatopsik - B.

Kui terastopsikud olid ahjus olnud, võeti need välja ning võrreldi visuaalselt enne ja pärast tehtud pilte. Terastopsikute siseseintel oli näha šlakkumist ja korrosiooni teket (joonis 3.5).



Joonis 3.5. Pärast ahju kaoliinita ja kaoliiniga tuhatopsikud. Joonise selgitus: kaoliinita tuhatopsik - A, kaoliiniga tuhatopsik - B.

3.3. Kaoliiniga ja kaoliinita tuhatopsikute omavaheline võrdlemine

Esialgu võrreldi omavahel visuaalselt erinevate sisuga topsikuid. Ilma kaoliinita tuhk oli topsikus pehme, kaoliiniga tuhk oli kõva ja lisaks sellele esines ilma kaoliinita tuhatopsiku siseseintel rohkem šlakkumist ning seinad olid näpuga katsudes karedad. Lisaks kaoliiniga topsikul oli sein puhtam ja näpuga polnud tunda karedust.

Nähti ka seda, et kui kaoliiniga tuhatopsikut mitte segada, siis selle sisu ei tule välja või kui tuleb, siis suurtes tükkides (joonis 3.6), sest kaoliin on tekitanud ühtse kihi. Ilma kaoliiniga tuhatopsiku korral seda olukorda ei tekkinud, sai ilma segamata teise topsikusse valada.



Joonis 3.6. Kokkujäänud tuhaosakesed kaoliiniga tuha korral kukkusid teise topsikusse.

Kaoliiniga tuhatopsikut tühjaks valades (joonis 3.8) ning seejärel pestes õrnalt topsiku ülemisi seinu, tuleb sinna tekkinud kiht kergelt maha võrreldes ilma kaoliinita tuhatopsiku korral (joonis 3.7).



Joonis 3.7. Kaoliinita tuhatopsiku seinad mustemad.



Joonis 3.8. Kaoliiniga tuhatopsiku seinad puhtamad.

Järgmiseks viidi läbi kraanivee survekatsetus topsikute peal lastes mõned sekundid veel joosta terastopsiku sisemuse pihta, seejärel toatemperatuuriga topsikuid kuivatades. Kaoliiniga tuhatopsiku kuivamine oli kordades kiirem kui kaoliinita tuha topsiku korral. Ilma kaoliinita tuhatopsiku (joonis 3.9) põhja ja seintele jäid suuremad tuhaosakesed. Kaoliiniga tuhatopsikul (joonis 3.10) oli topsi põhi puhtam ning visuaalsel vaatlemisel ei esinenud tuhaosakesi kui ilma kaoliinita tuhatopsikul, väiksem kogus jäi pindadele.



Joonis 3.9. Kaoliinita tuhatopsiku pesemine I kord.



Joonis 3.10. Kaoliiniga tuhatopsiku pesemine I kord.

Järgmisena prooviti näpuga hõõruda ja kraanivee abiga tugevalt tuhatopsikuid seest pesta, mis ideaalis võiks anda veel parema võrdluse. Katlas puhastatakse pindu tugeva madalrõhuauru survega ja veekahuritega, mis peaks tagama hea pindade puhastamise. Näpuga hõõrudes oli tunda ilma kaoliinita tuhatopsiku seintel tugevamaid sadestisi, jõulisemalt hõõrudes ning üritades ära likvideerida, ei õnnestu ja peale kuivamist on näha, et sadestised ei ole eemaldunud, kaoliiniga tuhatopsik on puhtam, aga siiski esineb sadestisi kuid need pole nii tugevalt seotud topsiku pindadega. Peale seda tegevust lasti topsikutel toatemperatuuril, umbes 26 kraadi juures kuivada. Kaoliiniga tuhatopsiku korral olid seinad tuha- ja kaoliiniosakestega seotud (joonis 3.12) ja kaoliinita tuhatopsikul oli näha rohkem topsiku seinte šlakkumist (joonis 3.11) ning pinnaga tugevasti sidunud tuhaosakesi.



Joonis 3.11. Kaoliinita tuhatopsiku pesemine II kord.



Joonis 3.12. Kaoliiniga tuhatopsiku pesemine II kord.

3.4. Katse järelkus

Hinnang katsele on 10-punktiüsteemis 5 punkti, sest see katsetus ei ole numbriliselt võrreldav ning näpuga ja silmaga uurides jääb katse kohta järelkuste tegemine puudulikuks.

Samas see andis võimaluse võrrelda kahte erineva sisuga topsikut, mis peale ahjuskäiku erinesid teineteisest. Kaoliinita tuhatopsikul olid tuhaosakesed seinapinnaga seotud ja tekkinud ka šlakkumine, mis jõuliselt kraanivee abil näpuga hõõrudes maha ei tulnud. Kaoliiniga tuhatopsiku korral esines topsiku seintel tugevasti omavahel seotud tuha- ja kaoliiniosakesi, millest võime järeldada, et tuhaosakesed ei ole otseselt seotud terastopsiku seinapinnaga, vaid need on segunenud kaoliiniosakestega, mis ei lase tekitada nii tugevat pinnaga haakumist. Katse käigus ei õnnestunud kasutada tugevamat survemasinat, et proovida topsikute seinu puhtamaks saada. Väiksele pinnale näpuga hõõrudes tekkiv surve on sobiv selleks, et saavutada antud olukorras maksimaalne tulemus.

Autori arvates suurimaks puuduseks on kaoliini mõju hindamisel see, et visuaalne ja näpuga katsudes hindamine on pinnapealne, mis ei pruugi täit tõde anda. Praktiline katse andis ülevaate sellest, mis pilt võiks avaneda katlas sees toimuvast kui puiduhakke põletamisel kasutada kaoliini või mitte kasutada. Temperatuuride omavaheline võrdlusesse seadmine näitas küllaltki suurt erinevust, mis on autori arvates selle töö tõhusaim viis. Saadud tulemused pakuvad piisavat põhjendust sellele, miks kasutatakse kaoliini ja kas reaalselt sellest kasu on. Edaspidises uurimises kaoliini mõju küttepindadele peaks katla seiskama, võtma küttepindadelt analüüsiproovid nii kaoliinita kui ka kaoliiniga töötaval katlal ning seejärel tuleb luua võrdlusmoment laboris. Autor on arvamusel, et kaoliini peaks kasutama, aga selle kohta võiks teha teadusuuring suuremate võimsustega keevkihtkateldegaga, kus põletatakse ainult puitkütust, mis selgitaks välja kaoliini kasutamise õigsust ja tõhusust. Mida vähem põlemisprotsessi häiritakse puhastustehnoloogiatega, näiteks veekahurite tehnoloogiaga, seda efektiivsem põlemine on ja katel püsib balansis. Kaoliini kasutamine õigustab end, sest tema protsessi lisamine toimub passiivselt ja seguneb enne katlasse sisenemist kütusega, mis ei häiri otseselt põlemist.

KOKKUVÕTE

Puidu põletamisel eralduvad ained, mis tekitavad raskesti eemaldatavaid sadestisi. Sadestiste tekkimisega küttepindadele kaasneb soojusvahetuse vähenemine, mis pidurdab veetorukatlas vee muundumist auruks. Töö eesmärgi saavutamiseks tutvuti puitkütuse omadustega ning tema põlemisel tekkivate mõjudega küttepindadele, käsitleti eelnevaid teadusuuringuid, võrreldi omavahel küttepindade ja suitsugaaside temperatuuri näituseid, mis pärinesid digitaalsest ajaloograafikust. Peale selle viidi läbi kaoliini ja tuhaga katsetus 1000 °C juures.

Kaoliini kasutamine hakke hulgas on õigustatud ja küttepinnad püsivad puhtamana, sest see vähendab puhastustehnoloogiate, näiteks veekahurite tehnoloogia kasutamist, mis hoiab ära katlale termošoki tegemise. Lisaks aitab kaasa suitsugaaside temperatuuri vähenemisele, mis tähendab, et küttepinnad püsivad puhtamad ja tõmme ei vähene. Kaoliin on lihtsa ehitusega, sisaldades minimaalselt muid aineid ning tema lisamine kütuse etteandesüsteemi on hõlbus. Rootsi Chalmersi tehnikaülikooli teadusuuring väidab, et kaaliumsoolad tekivad küttepindadele puitkütuste põlemise tõttu, kuid kaoliin on tõhus absorbent erinevatele kaaliumiühenditele. Bioflexi uurimisprojekti leiti, et kaoliini lisamisel papli hulka vingugaasi ja tahkete osakeste hulk vähenes ning soojusjuhtivus paranes. Küttepindade ja suitsugaaside temperatuuride vahe enne ja pärast kaoliini lisamist oli olemas, sest kui võrrelda aprillikuude andmeid 2017. ja 2021. aastatel, siis käesoleval aastal on küttepindade temperatuurid olnud kõrgemad, mis tähendab, et soojusvahetuspinnad on puhtamad. Selle juures peab arvestama, et temperatuuride erinevus võib tingitud olla ka muudest nähtustest, näiteks katla töötamise ajast, kütuste erinevatest kasutamisest, kas on märg kütus ning teised faktorid. Andmete võrdluses suitsugaasi teine temperatuuriandur ei näidanud kahel aastal erinevust, mis tähendab, et tuleks uurida, miks see nii on. Kaoliini ja tuha katsetamine 1000 °C ahjus näitas erinevust kaoliini kasutamisel ja mitte kasutamisel. Kaoliini lisamisel ei olnud topsiku sisepinnad otseselt haakunud tuhaga ning pesemisel oli see kergemini eemaldatav. Kaoliinita tuhatopsiku korral olid sisepinnad karedamad. Lisaks esines visuaalsel vaatlemisel tugevaid sadestisi.

Edaspidi vajaks uurimist, miks suitsugaaside teine temperatuurinäit ei näidanud kahel aastal erinevust, kuigi esimene näitas ning viia läbi katsetus, kas teaduslikus mõttes on kaoliini kasutamine kasulik nii suurtel kateldel. Lisaks tekib küsimus, kas hetkel AS Anne Soojuse veetorukatlal kaoliini lisamine on optimaalne.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Keskkonnaministeerium. (2017). Pariisi kokkulepe. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/kliima/rahvusvahelised-kokkulepped/pariisi-kokkulepe> (21.05.2021).
2. Keskkonnaministeerium. (2018). Kasvuhooneefekt ja kasvuhoonegaasid. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/kasvuhooneefekt> (21.05.2021).
3. Eesti Statistika Kvartalikiri. (2009). Koostootmine kui energiasäästuvõimalus. Tallinn: Eesti Statistikaamet. [veebileht] <https://www.stat.ee/dokumendid/51776> (21.05.2021).
4. **Ots, Arvo.** (2016). Tahkekütuse keevkihtpõletustehnika. Tallinn: TTÜ kirjastus. 799 lk.
5. Eesti Energia. (2011). Eesti Energia ja CNIM Grupp panid nurgakivi Iru elektrijaama jäätmeenergiaplokile. [veebileht] https://www.energia.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/pressrelease_15062011_cnim_grupp (08.05.2021)
6. Siemens Energy. (s.a). One of the most efficient combined heat and power plants in Europe. [veebileht] <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/references/marzahn-power-plant.html> (08.05.2021)
7. **Patel, S.** (2016). One of the world's biggest biomass-fired CHP plants is inaugurated. - *Power Magazine*. [e-ajakiri] <https://www.powermag.com/one-worlds-biggest-biomass-fired-chp-plants-inaugurated/> (08.05.2021)
8. U.S. Department of Energy. Overview of CHP technologies. (2017). Kättesaadav: https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/Overview_of_CHP_Technologies.pdf (08.05.2021)
9. **Kask, Ü., Vares, V., Saareoks, M.** (2020). Puitkütuste kasutaja käsiraamat. Tartu: Tartu Regiooni Energiaagentuur. 152 lk.
10. **Kask, Ü., Muiste, P., Vares, V.** (2010). Puitkütus. Tallinn: SA Erametsakeskus. [veebileht] <http://www.kolmtex.ee/files/Upload/Kasulikku/Puitk%C3%BCtus.pdf> (21.05.2021)
11. **Vaht, Alan.** 1999. Ökonomaiereri akustilise puhastuse efektiivsus Iru EJ aurukatlal nr. 2. Bakalaureusetöö. Tallinna Tehnikaülikool soojustehnikainstituut. Tallinn. 66 lk.
12. The Court Square Blog. (2019). 4 types of boiler tube cleaning methods – *TCSB*. [e-ajakiri] <https://liccourtsquare.com/2019/02/25/4-types-of-boiler-tube-cleaning-methods/> (08.05.2021)
13. Metso Hypex Katel koolitusjuhend protsessi-, ekspluatatsiooni- ja hoolduspersonalile. (2008). AS Fortum Tartu. 109 lk.

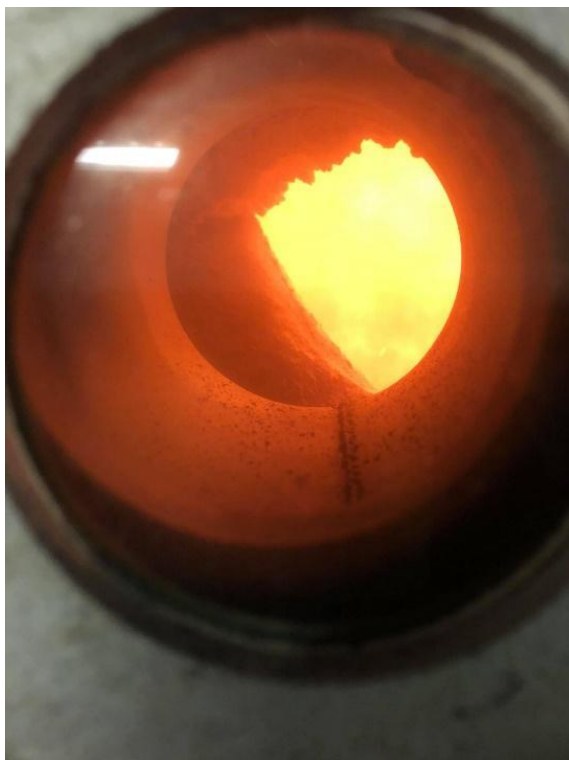
14. Babcock & Wilcox. Diamond Power IK-700 retractable sootblower. (2016). Kättesaadav: <https://www.babcock.com/en/products/-/media/4f00fd6b0cf94bacb31e43e38f3e07c7.ashx> (08.05.2021).
15. Clyde Bergemann. (s.a). Smart Cannon. [veebileht] <https://www.cbpg.com/en-gb/products-solutions/boiler-efficiency/load-boiler-cleaning-systems/furnace/smart-cannon> (08.05.2021).
16. **Bhutia, T., K., Lotha, G., Rodriguez, E., Sinha, S., Tikkanen, Amy., Young, G.** (2019). Kaolin. [e-ajakiri] <https://www.britannica.com/science/kaolin> (21.05.2021).
17. Mineral Data Publishing. Kaolinite. (2001). Kättesaadav: <https://rruff.info/doclib/hom/kaolinite.pdf> (08.05.2021)
18. Hudson Institute of Mineralogy. (s.a). Kaolinite. [on-line] <https://www.mindat.org/min-2156.html>
19. Fortum Tartu. (s.a). AS Anne Soojus. [veebileht] <http://www.fortumtartu.ee/meist/meie-ettevote/as-anne-soojus/> (08.05.2021).
20. Wikiwand. (s.a). Anne Soojus. [veebileht] https://www.wikiwand.com/et/Anne_Soojus (19.05.2021).
21. **Steenari, B. M., Fedje, K. K.** Addition of kaolin as potassium sorbent in the combustion of wood fuel - Effects on fly ash properties. (2010). Kättesaadav: https://www.researchgate.net/publication/222032218_Addition_of_kaolin_as_potassium_sorbent_in_the_combustion_of_wood_fuel_-_Effects_on_fly_ash_properties (08.05.2021).
22. **Brunner, T., Obernberger, I., Boman, C., Rebbling, A., Mack, R., Hartmann, H.** (2019). Guidelines for advanced fuel and boiler design. Kättesaadav: <https://bioflex-eranet.eu/media/2019/07/20190703-Guidelines-for-advanced-fuel-and-boiler-design.pdf> (08.05.2021).
23. **Rootalu, K.** (2014). Kirjeldav statistika. Kättesaadav: <https://samm.ut.ee/kirjeldav-statistika> (15.05.2021).
24. Nabertherm operating instructions. (2011). Kättesaadav: https://us.vwr.com/assetsvc/asset/en_US/id/14470670/contents (08.05.2021).

LISAD

Lisa 1. Fotod töötavast katlast



Katla ülekuumendid.

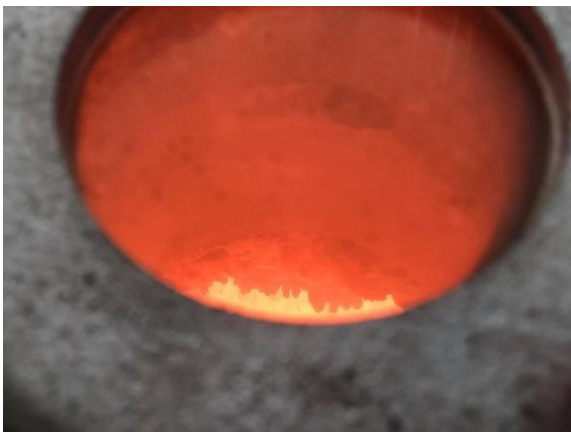


Koldeosa I.

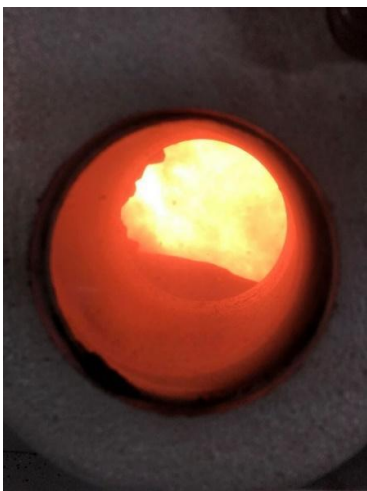
Lisa 1 järg



Koldeosa II.



Koldeosa III.



Koldeosa IV.

Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, OTT MARTENS,

(*autori nimi*)

sünniaeg 27.02.1998,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

KAOLIINI MÕJU VEETORUKATLA KÜTTEPINDADELE,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on lektorid Mart Hovi, MSc ja Külli Hovi, MSc,

(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor *digitaalselt allkirjastud*

(*allkiri*)

Tartu, 28.05.2021

(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Külli Hovi, digitaalselt allkirjastatud

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)

Mart Hovi, digitaalselt allkirjastatud

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)